

森林洪水低減機能に及ぼす流域樹冠 密度の影響に関する検討

INFLUENCE OF CANOPY DENSITY ON FLOOD ALLEVIATION FUNCTION IN FORESTS

吉田弘¹・端野道夫²

Hiromu YOSHIDA and Michio HASHINO

¹正会員 博(工) 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

²正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

Headwater basins may have alleviation functions of flood and drought. It is indispensable for designing the policies of flood control to evaluate the flood alleviation function explicitly in headwater basins. This paper focuses on the influence of canopy density on the flood alleviation functions of forests. The change of the spatially averaged canopy density due to the annual forest thinning for 6 years is evaluated in a forested mountain basin. The relationship between the spatially averaged canopy density and the rate of peak flow is investigated on 41 flood events for 6 years. It is clearly shown that the reduction of canopy density due to the forest thinning causes the increase of flood peak flow. It is suggested that rainfall interception due to forest trees affects the change of peak flow based on the results of short-term runoff analyses in the basin.

Key Words : flood alleviation function, forest thinning, canopy density, headwater basin
rainfall interception

1. はじめに

これまでの流域水文観測事例より, 森林流域は洪水低減機能および渇水緩和機能を有すると考えられている¹⁾. 特に近年では自然環境へ配慮する声の高まりから, 間伐, 枝打ちのような森林整備を行えば, 既往の豪雨や寡雨に対応して十分に洪水低減と渇水緩和の両方の機能を発揮できるという主張も見受けられる. この延長線上には, 森林を整備さえすれば洪水を低減できるからダムを構築する必要など無いという極論さえも存在する. 一方で土木工学においても, 洪水時に樹木の降雨遮断機能は洪水低減に対してほとんど効果を発揮しないから無視して解析しても大きな問題は生じない, という概念が支配的であった. しかしながら現実に上流で伐採が進むと, 短期間のうちにハイドログラフのピーク部分が先鋭化するという実感的な声を耳にすることが多いのも事実である. これは間伐による土壌構造の変化よりも遮断蒸発量の変化が雨水流出過程に影響を及ぼした可能性が高いことを示唆している.

これらの主張では, 森林の洪水低減機能に対する森林樹木と森林土壌の果たす役割が分けて議論されていない点に大きな問題がある. いずれについても

森林土壌の果たす役割の評価が中心であって, 森林土壌の機能のみで現象を説明する傾向にあることから自ずと議論に限界があり, ややもすると観念論に陥りがちである. また, 下流域の治水に効果的な森林管理情報は治山治水の現場技術者より喉から手が出るほど切望されており, その点からもこれまでは焦点の当てられることが少なかった森林樹木と洪水低減機能の關係に着目し, これらを定量化することは水文研究者にとって急務の一つである.

本論文では, 間伐にともなう森林樹冠密度の変化が流域での洪水低減機能に及ぼす影響の把握を目的とする. 過去9年間の森林試験流域における間伐と水文気象観測の記録に基づき, 森林樹木密度ならびに洪水ピーク流量の経年変化と相互關係を解析することで検討を試みた.

2. 解析対象流域と観測の概要

解析対象流域は図-1に示す徳島県白川谷森林試験流域²⁾である. 流域面積は23ha, 平均流路勾配は21.5°, 標高は740m~1100m, 土壌はほとんどが褐色森林土である. 流域の下流3/5はスギ人工林(樹齢27年~41年), 上流2/5は落葉広葉樹林(樹齢32

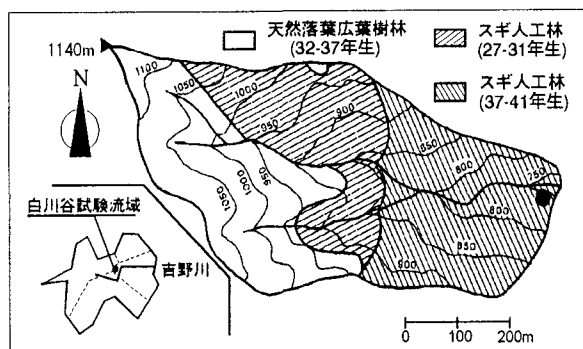


図-1 徳島県白川谷森林試験流域

年～36年)で覆われている。

林外雨は流量堰の設置された砂防堰堤の天端上で、樹幹流は約35年生のスギに取り付けた集水装置を利用して、樹冠通過雨は水平面積約7m²の集水板を用いてそれぞれ観測されている。気温、相対湿度、風速、純放射量は約22mの気象観測タワー上に設置した測器を利用して10分間隔で観測されている。なお後述のように当流域では年降水量が約2800mmで、夏季から秋季にかけて一雨が500mm以上にも達するような高強度の降雨に見舞われることが多い。それゆえ他地域で報告されているピーク降雨強度の数倍程度にまで及ぶこともあるのが大きな特徴である。

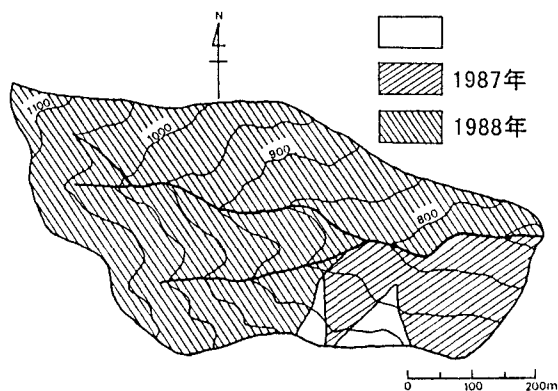
3. 間伐データの整理と樹冠密度の推定

(1) 流域での間伐記録

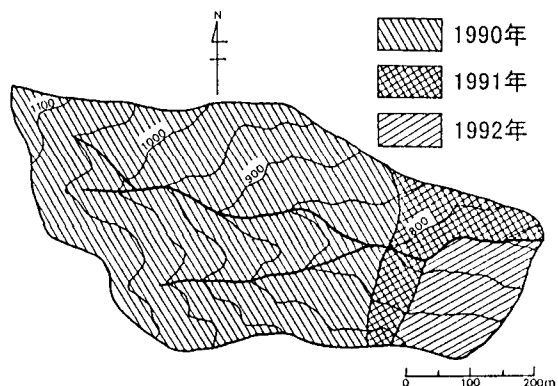
近年における間伐は、1987年から1992年にわたって実施された。この間の間伐施業面積および間伐率を表-1に、経年進行状況を図-2にそれぞれ示す。ただし間伐は、林産資源の育成という観点でスギとヒノキのみを対象として実施されたため、流域上流の約2/5を占める落葉広葉樹は残存している点に注意されたい。また間伐は三好郡山城町(1987年と1988年)と徳島県池田農林事務所(1989年～1992年)により2期に別れて実施されており、それぞれ実施期間内で秋冬期(10月～12月)に全流域について進められた。なお年度は4月から3月であり、水文年も同一としている。

表-1 森林施業面積と伐採率

年度	施業面積 (ha)	間伐率 (%)
1987	4.56	58
1988	18.00	27
1989	-----	--
1990	17.38	17
1991	3.60	17
1992	3.38	17



(a) 山城町施業分(1987年-1988年)



(b) 徳島県池田農林事務所施業分(1990年-1992年)

図-2 森林施業範囲の経年変化

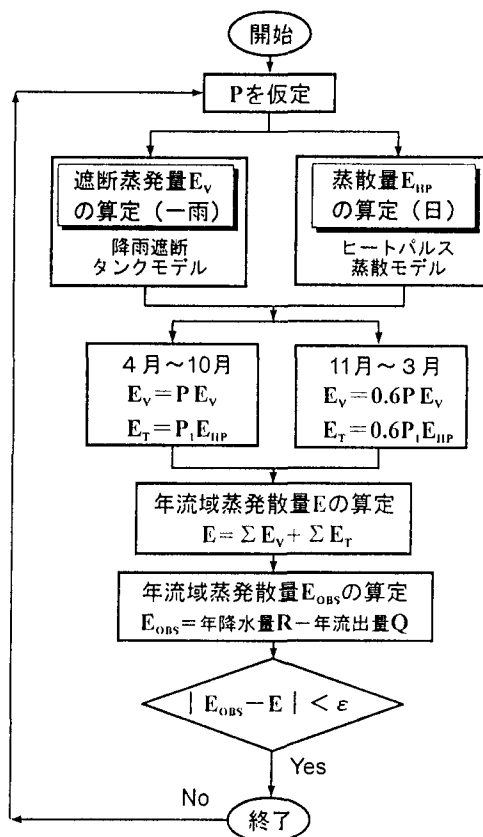


図-3 流域平均樹冠支配面積率算定の手順

(2) 単木に関する樹冠構造解析

代表木として樹齢約35年のスギを対象に樹冠のステール写真撮影を行い、画像解析結果から、まず1本の木の樹冠支配面積に占める葉部分と枝幹部分の占める割合 P_1 および P_2 をそれぞれ計算した。ここで、 $P = P_1 + P_2$ であり、1992年に解析した結果より $P_1 = 0.486$ 、 $P_2 = 0.054$ という値を得た。このスギの樹冠構造がそのまま流域で代表できると仮定すれば、枝葉の部分の面積割合は、 $P_1 = 0.9P$ 、 $P_2 = 0.1P$ とできる。

(3) 流域平均樹冠支配面積率の経年変化の推定

次に樹木間のギャップも考慮に入れた、流域に占める樹冠支配面積の平均的な割合 P の経年変化を現地観測データに基づいて推定する。

推定手順を図-3に示す。降雨遮断量については、まず P の初期値を仮定して、降雨遮断タンクモデル²⁾により一雨ごとの遮断蒸発量を計算して年間積算値 E_v を算定する。もう一方で、ヒートパルス蒸散モデル³⁾により算定される蒸散量 E_{HP} は実質蒸散面積で有効なことから、葉部分の面積率 P_1 を乗じた値 $P_1 E_{HP}$ を計算して年間積算値を求める。ただし、11月から3月の間は落葉期に属しており、流域の約40パーセントにおいて葉の部分は消滅する。したがって、この期間では遮断蒸発量および蒸散量ともに、0.6を乗じて修正する。最終的に両者の総和が水収支から算定される年間蒸発散量と一致するように、 P の値を試行的に探索する。得られた流域平均樹冠支配面積率の経年変化を表-2にまとめて示す。

表-2 流域平均樹冠支配面積率の経年変化

年度	樹冠支配面積率
1987	0.380
1988	0.336
1989	0.265
1990	0.265
1991	0.251
1992	0.244

表-2の結果より、間伐にともなう最も大きな樹冠支配面積率の減少は、1988年から1989年の間で認められる。したがって、この間において雨水流出率に大きな変化が現れると予想される。

4. 洪水到達時間と有効降雨強度の整理手法とその結果

(1) 洪水到達時間の整理方法

洪水ピーク流出率の定義に際して、以下のような2通りの方法AとBについて検討した。なお、前述のように降雨量と流出量は10分単位で観測されているので、洪水到達時間の解像度は10分である。時間単位量については10分単位の水文量を換算したもの

である。なお解析対象とした洪水イベントを表-3にまとめて掲げる。

a) 角屋・福島の整理方法³⁾ (方法A)

洪水ピーク流量に直接的な影響を及ぼすのは、洪水到達時間内での降雨量であると考えられるので、本論文では石原・高樺⁴⁾の理論検討を基にして角屋・福島³⁾が提案した洪水到達時間 t_p と有効降雨強度 r_e の定義を利用し、方法Aとする。

表-3 解析対象の洪水イベント

発生 年月日	総降雨量 (mm)	最大降雨 強度(mm/hr)	最大流出 強度(mm/hr)
87/05/13	122.0	24	3.642
87/07/15	522.0	81	7.722
87/07/16	522.0	30	15.534
87/08/31	94.5	90	16.602
87/09/10	47.5	72	3.138
87/10/17	228.5	36	10.944
88/04/13	87.0	90	3.990
88/06/02	258.0	180	14.556
88/06/08	51.0	111	3.222
88/06/25	149.5	177	8.712
89/03/04	181.5	30	8.874
89/08/02	115.5	33	4.860
89/08/15	86.5	27	4.488
89/08/27	141.5	39	6.864
89/08/30	55.5	69	8.082
89/09/06	173.5	72	12.390
89/09/13	415.0	72	19.068
89/09/19	167.0	84	25.218
89/09/22	79.0	27	4.422
90/05/19	110.0	18	4.506
90/08/22	445.0	102	40.926
90/09/17	553.0	57	9.666
90/11/04	102.0	21	3.642
91/03/22	57.0	30	2.538
91/06/09	116.0	30	3.870
91/06/13	59.5	84	6.750
91/06/25	35.5	72	3.990
91/07/04	85.5	39	3.330
91/07/27	65.0	87	5.442
91/07/29	129.0	30	4.656
91/09/14	154.0	51	5.418
91/09/27	142.5	18	5.562
91/10/01	96.5	27	4.398
92/08/04	68.5	51	3.810
92/08/06	60.5	33	4.380
92/08/08	165.0	21	11.694
92/08/14	68.0	27	3.810
92/08/18	219.5	36	7.284
92/08/25	125.5	69	10.434
92/09/25	117.5	45	9.234
92/09/29	110.5	42	10.758

角屋らの報告では以下のような関係があるとされている。

$$t_p = CA^\alpha r_e^\beta \quad (1)$$

ここで、 C, A, α, β はそれぞれ、流域固有の定数、流域面積、および定数である。

この方法では、洪水ピーク流量時 ($t = t_{QP}$) の降雨強度 ($r = r_{QP}$) を基準としてそれ以前の時刻で降雨強度が r_{QP} と一致する時刻 ($t = t_r$) を検索し、洪水到達時間を $t_p = t_{QP} - t_r$ と定義する。更に $t = t_r$ から $t = t_{QP}$ までの降雨量 R_E を t_p で除すことで、 $r_e = R_E / t_p$ を定義する。

なお kinematic wave 理論で斜面流の運動則を表現するパラメータである p と β とには、 $\beta = p - 1$ の関係がある。したがって整理の結果からは、洪水到達時間と有効降雨強度の決定の妥当性のみならず、斜面流の表現に適切な運動則についても知見を得ることができる。

b) ハイドログラフとハイトグラフのピーク間隔の2倍を洪水到達時間とする方法 (方法B)

ハイドログラフとハイトグラフについてそれぞれのピーク時刻 (t_{QP} と t_{rP}) を見だし、 $t_p = 2.0(t_{QP} - t_{rP})$ と定義する。期間中の有効降雨強度 r_e の定義については、 t_{rP} から t_{QP} までの降雨量を R_E と定義し、 $r_e = R_E / t_p$ とする場合を方法Bとする。

(2)洪水到達時間と有効降雨強度の整理結果

洪水到達時間 t_p と有効降雨強度 r_e の関係について方法Aと方法Bの両方から検討した結果を、図-4および図-5にそれぞれ示す。図-4と図-5から、方法Aと方法Bのいずれを用いた場合についても洪水到達時間 t_p と有効降雨強度 r_e とは、概ねべき関数の関係にあることがうかがえる。ただし両者の関係に若干のばらつきが認められるのは、観測誤差に加えて、解析の基礎となるデータが10分単位であるため、それ以上の時間解像度が得られないこと、降雨と流量のピーク判定や、ピーク流量時の降雨強度と一致する降雨強度を見いだす過程で若干の任意性が入ることに起因すると考えられる。

図中にプロットされたデータ群に(1)式を当てはめて考えると、三角形を用いた勾配標で比較できるように、べき数 β は概ね-0.4から-0.7の範囲に収まっている。斜面流の解析に kinematic wave 理論を適用した場合の流動則としては、周知のように Manning則 ($p = 0.6$) および層流則 ($p = 1/3$) を適用した場合に、(1)式の関係を満たすべき数はそれぞれ-0.4および-0.67となる。

既往の丘陵地や都市域での解析報告からは、Manning則で説明できる場合が多いが、林地での適用例ではどちらかというと-0.5に近い例が多いようである。また端野⁵⁾は徳島県那賀川源流域での解析を通して、表面流出現象に対しては層流則の適用性

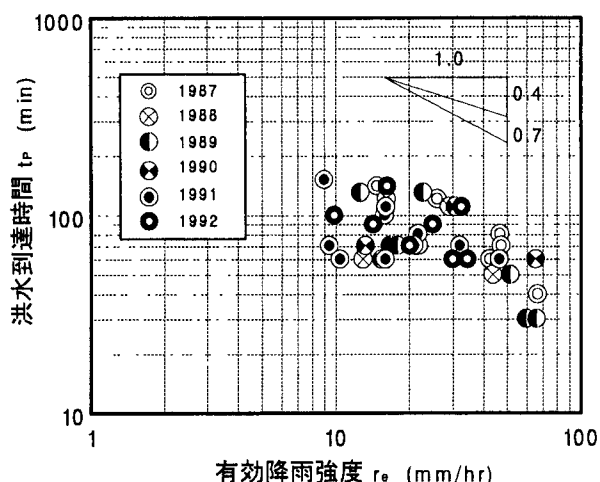


図-4 洪水到達時間 t_p と有効降雨強度 r_e の関係 (方法A)

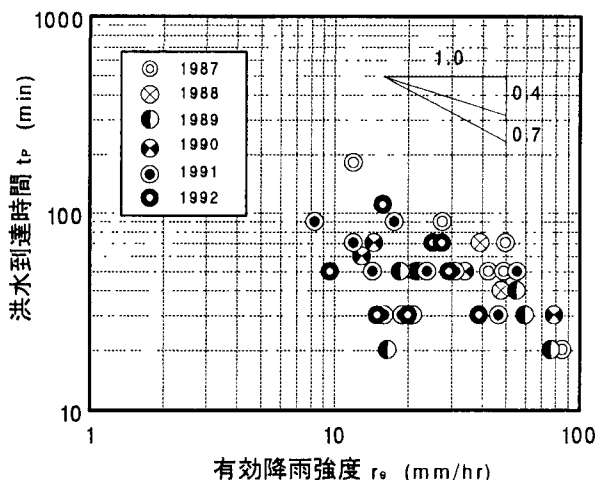


図-5 洪水到達時間 t_p と有効降雨強度 r_e の関係 (方法B)

が高いことを報告している。べき数に幅が現れるのは中間流の影響が除去されていないためと考えられることから、強いて判断すれば今回の結果は表面流出を層流則で表現する場合に最も近いと考えられる。これまでの報告例と比較して、降雨強度が極端に大な割に土壌層厚は極めて薄い地域であることから、とりわけ表面流出の発生しやすい場と考えられるが、今後更に現地観測を通して明らかにする必要がある。

方法Bを用いた場合の洪水到達時間が方法Aを用いた場合よりも若干短いのは、1987年から1992年の間に生じた洪水イベントで、ハイトグラフの立ち上がりから降雨ピークまでの時間が降雨ピークから流量ピークまでの時間よりも長くなるイベントが多かったためと考えられる。

年別でみると、間伐の開始年から終了年に至るまで、 t_p と r_e との関係に経年的な変化は認められない。したがって観測や整理の誤差を考慮に入れば、間伐の進行にともなって降雨-流出過程の時間的な応

答関係には大きな影響が現れていないと判断される。降雨－流出過程において雨水流出の遅れと密接に関係するのは森林土壌の孔隙組成や鉛直方向の層構造とされていることから、間伐が森林土壌へ及ぼす影響はさほど大きくなかったことを示唆していると考えられる。

4. 洪水ピーク流出率と樹木密度の関係

(1) 洪水ピーク流出率の定義と流域平均樹冠支配面積率との関係

方法Aと方法Bのいずれについても、洪水ピーク流出率 I_{QP} を洪水ピーク流出強度 q_P と有効降雨強度 r_e を用いて、 $I_{QP} = q_P / r_e$ で定義する。個々のイベントでは I_{QP} に相当なばらつきが見られるので、イベント単位での整理は困難であった。そこで経年変化の把握を主眼として、各年ごとの平均値を用いて流域平均樹冠支配面積率の変化にともなう洪水流出特性の変化を検討する。

表-4に流域平均樹冠支配面積率と方法AおよびBに基づく洪水ピーク流出率をまとめて示す。

表-4 洪水ピーク流出率 I_{QP} の経年変化

年度	P	方法A	方法B
1987	0.380	0.247	0.246
1988	0.336	0.284	0.248
1989	0.265	0.325	0.287
1990	0.265	0.332	0.306
1991	0.251	0.279	0.254
1992	0.244	0.367	0.375

(2) 洪水ピーク流出率の年平均値と流域平均樹冠支配面積率の関係

図-6に洪水ピーク流出率 I_{QP} と流域平均樹冠支配面積率 P の経年変化を示す。方法Aで整理した洪水ピーク流出率 I_{QP} を用いた場合について検討すると、1989年 ($P = 0.251$) を除いて、間伐の進行により P が減少すると I_{QP} は増加する傾向が明瞭である。

方法Aによる解析結果で特に注目されるのは、 P と I_{QP} の間にほぼ線形的な関係が成り立っていることである。一方で、方法Bを用いて整理した場合には、方法Aの場合ほどは明瞭な関係が認められないものの、やはり1989年を除外すれば概ね P の減少とともに I_{QP} は増加傾向を示していることが読みとれる。したがって、洪水到達時間と有効降雨強度の定義で異なる2つの方法を用いてもほぼ同様な結果が得られたことから、森林樹木の伐採にともなう樹冠密度の減少は、明らかに洪水ピーク流出量の増加につながっていると判断される。

(3) 降雨遮断蒸発量の洪水ピーク流量に及ぼす影響
森林樹木による降雨遮断蒸発は主として葉や小枝の

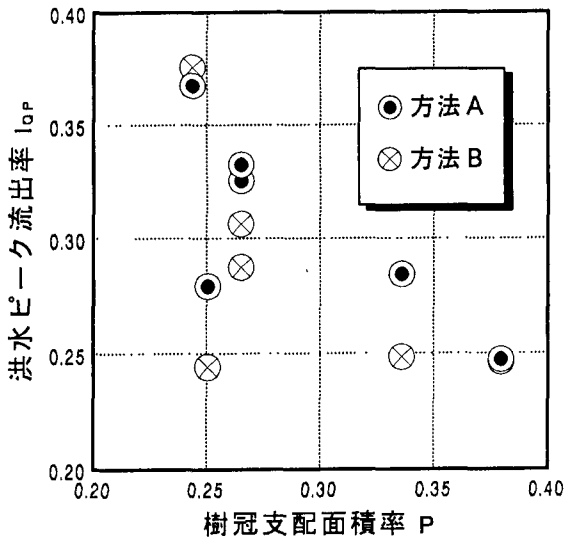


図-6 洪水ピーク流出率 I_{QP} と流域平均樹冠支配面積率 P の経年変化

部分で生起している。したがって樹冠密度の減少は遮断蒸発が生起する場の面積の減少に対応するので、当然ながら降雨遮断蒸発量の減少をもたらすはずである。降雨遮断蒸発量が減少すればその分だけ地表へ到達し洪水流出に寄与する雨水量が増大するので、渓流流量が増大しても何ら不思議はない。

既往の実試験流域における観測解析結果^{2), 6), 7)}より、針葉樹から広葉樹まで樹種を問わず、10mm程度の小降雨量から200mm近い大降雨量の広範な雨量範囲の降雨イベントに対して、一雨降雨量と一雨降雨遮断蒸発量との間に線形関係が認められている。このことは、降雨量が多くなっても一雨降雨量と一雨降雨遮断蒸発量との比の値はほぼ一定であり、降雨量が増えるほど降雨遮断蒸発量もまた増えることを意味している。

降雨遮断量は葉によって捕捉される水分の容量（付着水分容量）に規定されるという考え方があるが、これはあくまでも降雨終了後の蒸発過程に関する適用可能である。降雨イベント期間中に観測される遮断蒸発量の大半は降雨中に発生している事実を考えると、先述の降雨遮断に対する考え方では、降雨イベント期間内での遮断蒸発量を極端に過小評価することになる。しかしそれでは相当な水分量が高湿度な状態でも蒸発していることになって一見すると矛盾した結果に思えるが、著者らは枝葉に雨滴が衝突する際にそれ自身と枝葉に付着した雨水も含めて飛沫となり、粗度の大きく気流の乱れも大きい森林樹冠の上部で浮遊した後、周囲からの移流エネルギー等によって蒸発する過程が上述の現象を説明する鍵になると考えている²⁾。降雨時に山腹斜面でもうもうと雨煙が立ち上る光景を思い起こせば十分に納得される。したがって樹冠密度の変化は遮断蒸発量、特に降雨中蒸発量の変化を通して、地表到達雨量に変化をもたらすことから、洪水ピーク流量への影響も大きいと考えた方が妥当であろう。

(4) 短期流出解析による検討

前述の結果を検討するために、間伐前の1986年と間伐後の1992年について洪水イベントにおいて流出解析を実施した。地表到達雨量を算定する降雨遮断タンクモデル²⁾のパラメータは同流域で既に同定済みの値を利用した。なお降雨時であるので蒸散量は考慮していない。また溪流流量を算定する直列2段タンクモデル⁸⁾については、表面流出の卓越する場であることを考慮して、主として表面流出の運動則に関連する λ_0 、A層厚に対応する γD 、早い中間流出の時定数 λ_s 、浸透・降下強度に対応する f^* 、 λ_g の5つのパラメータのみを同定対象とし、それ以外のパラメータについては、既に同流域で同定済みの値を利用した。同定結果を表-5に示す。

表-5 パラメータ同定結果

年度	λ_0	f^*	λ_g	λ_s	γD
1986	4.86	1.80	0.120	0.065	45.0
1992	4.86	2.30	0.135	0.057	47.0

パラメータによって値に若干の大小が認められるが、これらのパラメータの流出に対する感度はこの程度の変化であれば小さいことから、この6年間に於いて土壌内での浸透・流出過程に関するパラメータには概ね大きな変化はないと判断される。

それぞれの年におけるハイドログラフの再現結果について、それぞれ図-7と図-8に示す。適用したモデルにより両年で流出量がうまく再現できていることから、間伐が森林土壌の浸透・流出特性に大きな影響を及ぼしたとは考えにくい。したがって6年間での流出量の変化は、地表到達雨量の変化によると考えるのが妥当である。すなわち蒸発面積と密接に関連する樹冠密度の変化が遮断蒸発量の変化を通して流出量に変化をもたらしたと考えられる。

5. おわりに

本論文では現地での間伐と水文気象観測データの解析を通して、洪水低減機能に及ぼす森林樹木の樹冠密度の影響について検討した。その結果、森林樹冠密度と洪水ピーク流量との間には明瞭な負の相関が認められた。このことは、間伐を抑制して樹冠密度を高く維持することにより洪水ピーク流量を低減させることができることを意味しており、森林流域の洪水低減機能をより有効に発揮させるためには、枝打ちや間伐という森林施業をむしろ抑制することが必要であることを示している。また、洪水到達時間と有効降雨強度の関係や短期流出解析の結果から判断して、本流域では、土壌構造の変化よりも樹冠密度の変化による降雨遮断蒸発量の変化が洪水ピーク流量に影響を及ぼすことが示唆された。

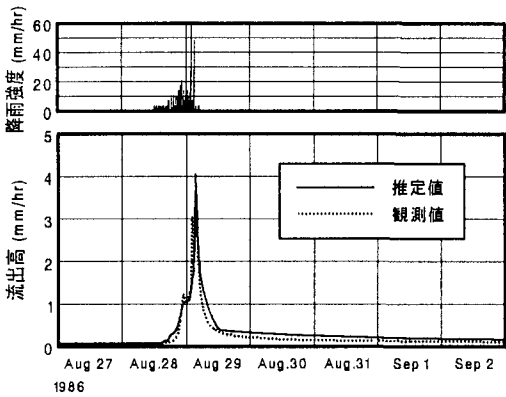


図-7 ハイドログラフの再現結果(1986. 8. 27-9. 2)

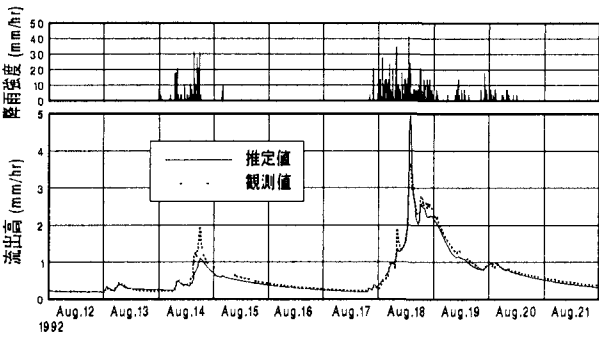


図-8 ハイドログラフの再現結果(1992. 8. 12-8. 21)

より貴重な間伐記録を、徳島県森林土木協会より試験流域を提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- たとえば、塚本良則，城戸毅：森林伐採による年流出量の増加について，水利科学，No.161，pp.26-38，1989。
- 吉田弘，端野道夫，村岡浩爾：樹幹流データを利用した降雨遮断タンクモデルによる森林蒸発量の推定，水文・水資源学会誌，Vol.6，No.1，pp.19-30，1993。
- 角屋睦，福島晟：中小河川の洪水到達時間，京都大学防災研究所年報，第19号B-2，pp.143-152，1976。
- 石原藤次郎，高棹琢馬：中間流出現象とそれが流出過程に及ぼす影響について，土木学会論文集，79，pp.15-23，1962。
- 端野道夫：山地小流域での降雨流出解析，水理講演会論文集，第26巻，pp.183-189，1982。
- 鈴木雅一，加藤博之，谷誠，福嶋義宏：桐生試験地における樹冠通過雨量，樹幹流下量，遮断量の研究(1) 樹冠通過雨量と樹幹流下量について，日本林学会誌，第61巻6号，pp.202-210，1979。
- 水谷完治，谷誠，渡辺力，安部和詩：落葉広葉樹林における遮断量の推定(2)，水文・水資源学会1997年研究発表会要旨集，pp.157-158，1997。
- 端野道夫，吉田弘，村岡浩爾：森林水循環モデリングと水収支の評価，水工学論文集，第36巻，pp.521-528，1992。

(1997. 9. 30受付)

謝辞：徳島県池田農林事務所ならびに徳島県山城町